

REFUERZO DE PAVIMENTOS SOBRE ARCILLAS EXPANSIVAS¹

Jorge G. Zornberg²

Resumen: El refuerzo de la capa base de pavimentos se ha utilizado a los efectos de: (i) aumentar la vida útil de un pavimento manteniendo el espesor de la capa base, o (ii) disminuir el espesor de la capa base manteniendo la vida útil del pavimento. Este artículo describe una tercera aplicación del refuerzo basal de pavimentos, a saber, la mitigación de grietas longitudinales inducidas en pavimentos construidos sobre subrasantes compuestas de arcillas expansivas. Aunque todavía existe la necesidad de una mejor caracterización de las propiedades correspondientes a la interacción suelo-refuerzo, observaciones de campo ponen de relieve los importantes beneficios asociados con el uso de geomallas en pavimentos construidos sobre arcillas expansivas

Palabras clave: arcillas expansivas, geosintéticos, pavimentos, refuerzos, subrasante.

REINFORCEMENT OF PAVEMENTS OVER EXPANSIVE CLAYS

Abstract: Basal reinforcement of pavement systems has been used for the purposes of: (i) increasing the lifespan of a pavement while maintaining the thickness of the base course, or (ii) decreasing the thickness of the base course while maintaining the lifespan of the pavement. This paper describes a third application of basal reinforcement of pavements, namely, the mitigation of longitudinal cracks induced in pavements constructed over highly plastic, expansive clay subgrades. Overall, field observations highlight the significant benefits associated with the use of geogrids in pavements over expansive clay subgrades, although there is still the need for better characterization of the relevant soil-reinforcement properties.

Keywords: expansive clays, geosynthetics, pavements, reinforcement, subgrade.

INTRODUCCIÓN

El refuerzo basal de un pavimento involucra la adición de un geosintético en la parte inferior o dentro de la capa base para aumentar la capacidad estructural de un pavimento mediante el desarrollo de esfuerzos de tracción. Dos son los beneficios que tradicionalmente se han considerado: (1) mejoramiento de la vida de servicio del pavimento o; (2) disminución de la sección estructural manteniendo la misma vida de servicio. El refuerzo basal podría también considerarse para proveer un factor de seguridad adicional sobre la capacidad de carga de un pavimento construido sobre suelos blandos para tomar en cuenta deficiencias del diseño.

La utilización de geosintéticos en carreteras ha involucrado varias funciones. Mientras que los geotextiles se han utilizado para proporcionar separación, filtración y drenaje lateral, las geomallas se han utilizado primeramente para satisfacer la función de refuerzo. Los mecanismos por los cuales los geosintéticos proporcionan refuerzo a un pavimento incluyen los siguientes:

- Confinamiento lateral, que minimiza la expansión lateral de los agregados de las capas de base y sub-base para:
 - (i) aumentar el módulo de la capa base,
 - (ii) mejorar la distribución de los esfuerzos verticales sobre la subrasante, y
 - (iii) reducir el esfuerzo cortante a lo largo de la parte superior de la subrasante.
- Efecto membrana, que resulta en esfuerzos de tracción si las deformaciones del pavimento son significativas.
- Aumento de la capacidad portante, que puede ser desarrollado debido a las restricciones impuestas al desarrollo de superficies de falla a través de la subrasante.

Entre los varios mecanismos mencionados, el mecanismo primario asociado con el refuerzo basal en pavimentos flexibles es la restricción lateral o confinamiento (Holtz et al., 1998). La mejora del sistema de pavimento proporcionada por el geosintético de refuerzo se ha cuantificado por las relaciones de TBR o BCR:

¹ Artículo recibido el 8 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA. E-mail: zornberg@mail.utexas.edu

- TBR (Relación de Beneficio de Tráfico): Representa la relación entre el número de ciclos de carga sobre una sección reforzada para alcanzar un estado de falla y el número de ciclos de carga sobre una sección no reforzada, con la misma geometría y materiales constituyentes, para alcanzar el mismo estado de falla.
- BCR (Reducción de la Capa Base): Corresponde a la reducción porcentual en el espesor de la capa base o sub-base reforzada en relación al espesor de una sección no reforzada, construida con los mismos materiales, para alcanzar un dado estado de falla.

Se han realizado varios estudios para cuantificar la efectividad de las geomallas para refuerzo de pavimentos (Al-Qadi, 1997; Berg et al., 2000; Fanin y Sigurdsson, 1996; Perkins y Ismeik, 1997a, 1997b). Si bien las observaciones de campo indican un buen desempeño de pavimentos reforzados con geosintéticos, las propiedades que rigen la contribución de los geosintéticos para el refuerzo de pavimento no han sido identificadas claramente. Esto ha conducido a metodologías de diseño controversiales para estos sistemas.

Una nueva aplicación de refuerzo basal de pavimentos ha sido recientemente implementada en Texas, Estados Unidos, con el fin de mitigar el desarrollo de grietas longitudinales en pavimentos construidos sobre una arcilla expansiva. La Figura 1 muestra el desarrollo de una grieta longitudinal en una carretera de volumen de tráfico bajo en el área central del Estado de Texas. La grieta que se muestra en la figura se inició en la parte inferior de la estructura del pavimento y se propagó hasta la superficie. Este patrón de grietas es típico de variaciones volumétricas asociadas con la presencia de arcillas expansivas. La Figura 2 muestra la sección de un pavimento reforzado con geomalla, usada por el Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) en casos que involucran subrasantes de arcilla expansiva. Las geomallas de refuerzo han sido frecuentemente utilizadas en combinación con estabilización con cal o cemento.



Figura 1: Fisuras longitudinales típicas desarrolladas en pavimentos sobre arcillas expansivas.

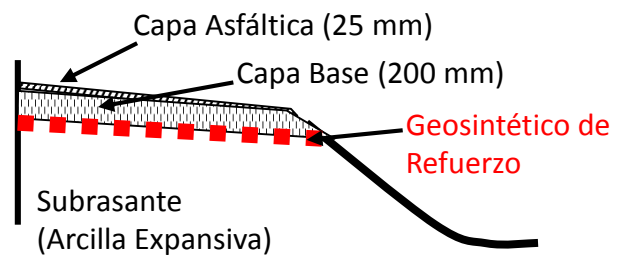


Figura 2: Sección típica de pavimento para una carretera de bajo volumen en Texas, usando refuerzo para mitigar fisuras inducidas por arcillas expansivas.

En resumen, el uso de las metodologías empíricas disponibles actualmente, basadas en la Relación de Beneficio de Tráfico (TBR) o en la Reducción de la Capa Base (BCR), no pueden aplicarse directamente para el diseño de pavimentos que presentan problemas asociados con grietas longitudinales desarrolladas por la presencia de arcillas expansivas. Específicamente, la aplicabilidad de las metodologías existentes a las condiciones típicas de pavimentos sobre subrasantes de arcilla expansiva necesita ser reevaluada. Este artículo presenta algunas de las lecciones aprendidas a partir de la evaluación del desempeño de proyectos recientes de refuerzo de pavimento sobre arcilla expansivas.

MECANISMOS DE DESARROLLO DE GRIETAS LONGITUDINALES

La construcción de carreteras sobre arcillas expansivas en regiones como el centro de Texas ha resultado frecuentemente en un pobre desempeño debido al desarrollo de grietas longitudinales inducidas por las fluctuaciones de humedad en la subrasante. Estas condiciones ambientales no son generalmente evaluadas durante el diseño de pavimentos, que típicamente se centra directamente en las condiciones de tráfico. Sin embargo, variaciones volumétricas relacionadas con las variaciones estacionales de humedad han llevado al levantamiento del pavimento durante las estaciones lluviosas y a su asentamiento durante las estaciones secas. Como ha sido mencionado, la experiencia en TxDOT (las siglas en inglés de "Texas Department of Transportation") ha indicado que estos movimientos cíclicos causan daños considerables en forma de

grietas longitudinales. Estabilización de las carreteras en estas subrasantes se ha intentado a través de tratamientos de cal (Petry y Little, 2002) y más recientemente mediante el refuerzo con geomallas.

Se anticipa que los mecanismos que causan el desarrollo de las grietas longitudinales clásicas sean los esfuerzos de tracción inducidos por la flexión del pavimento debido a asentamientos que ocurren durante las temporadas secas. La Figura 3 ilustra el posible mecanismo que conduce al desarrollo de grietas longitudinales. Durante la estación seca ocurre la disminución del contenido de humedad del suelo en las cercanías de las hombreras del pavimento (Figura 3a). Esto conduce a asentamientos en la zona las hombreras pero no en las proximidades de la línea central del pavimento (donde la humedad del suelo se mantiene aproximadamente constante a lo largo de la temporada seca). Por otro lado, durante la estación lluviosa, ocurre un aumento del contenido de humedad del suelo en las cercanías de las hombreras del pavimento (Figura 3b). En este caso se produce un levantamiento en las cercanías de las hombreras pero no en las proximidades de la línea central del pavimento. Como se ilustra en la Figura 3, las grietas se desarrollan en la región donde el frente de humedad alcanza su máxima penetración por debajo el pavimento.

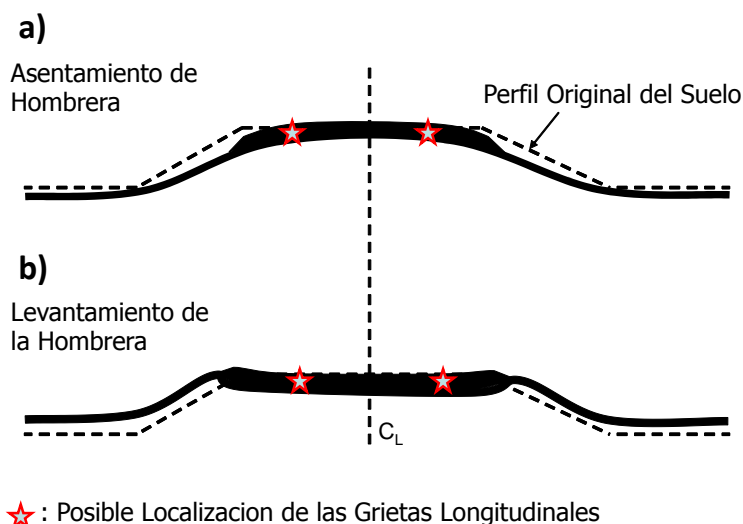


Figura 3: Mecanismos de deformación de un pavimento sobre arcillas expansivas: (a) Asentamientos durante la estación seca, (b) Levantamiento durante la estación lluviosa.

Observaciones de personal del Departamento de Transporte de Texas indican que el desarrollo de las grietas longitudinales ocurre hacia el final de la estación seca, lo que es consistente con el mecanismo previsto. También se ha reportado que las grietas frecuentemente llegan a cerrarse parcialmente durante la estación lluviosa.

EVALUACIONES DE CAMPO

Una evaluación sobre el impacto de la presencia de arcillas expansivas en pavimentos y las posibles metodologías de diseño se llevó a cabo recientemente (Zornberg et al., 2008). Los proyectos evaluados en este estudio fueron aquellos identificados en una encuesta enviada en 2007 para todos los Distritos de TxDOT. De 35 proyectos identificados que indican la presencia de arcillas expansivas, problemas involucrando el desarrollo de grietas longitudinales en el pavimento fueron reportados en 30 de ellos. A pesar que las directrices para el uso de geomallas no están bien establecidas, el uso de geosintéticos ha sido reportado en 26 de estos proyectos para intentar mejorar la vida de servicio del pavimento. Entre los varios geosintéticos utilizados, geomallas biaxiales han sido el tipo de refuerzo más común. Sin embargo, los geotextiles y mallas de vidrio también fueron utilizados en algunos de los proyectos. Los resultados obtenidos en esta encuesta se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Estudio de proyectos de pavimentos sobre arcilla expansiva.

	<i>Sí</i>	<i>No</i>
Se observaron problemas de grietas en pavimentos con subrasantes de arcillas expansivas	88%	12%
Se observaron problemas adicionales debido a la baja capacidad portante	94%	6%
Geosintéticos fueron usados en proyectos o reparaciones recientes	73,5%	26,5%

Varios de los proyectos en los que geosintéticos se usaron corresponden a pavimentos en el área de Fort Worth–Dallas. Esta área es conocida por tener problemas con arcillas expansivas. En general, los geosintéticos se han colocado en el

pavimento durante la construcción pero no se llevó a cabo ninguna evaluación del comportamiento después de la construcción. En resumen, mientras que la encuesta reveló un aumento en el uso de geosintéticos como refuerzo de pavimentos sobre arcilla expansiva, se notó una falta de directrices de diseño bien definidas y de criterios claros para la selección de materiales. Se visitaron varios de los proyectos y se aprendieron lecciones importantes. Estas experiencias se describen a continuación.

LECCIÓN 1: GEOSINTÉTICOS DE REFUERZO HAN IMPEDIDO EL DESARROLLO DE GRIETAS LONGITUDINALES

Uno de los proyectos evaluados como parte de este estudio proporcionó evidencias conclusivas del efecto benéfico del uso de geosintéticos como elementos de refuerzo sobre arcilla expansiva. Este proyecto consiste de la carretera FM 1915 ubicada en el condado de Milam, Texas, Estados Unidos. En 1996 se observó el desarrollo de una extensa red de grietas longitudinales sobre un tramo de 4 km de la sección del pavimento. Debido a esto, el pavimento fue reconstruido con un tratamiento con cal en un espesor de 0,25 m de subrasante y una capa asfáltica en la parte superior. Debido a la presencia de arcillas expansivas en la subrasante, se instaló una geomalla en la interface entre la base y la subrasante. A fin de evaluar el efecto de la geomalla sobre el espesor de la capa base requerida, se construyeron dos secciones reforzadas con geomallas. La primera sección (Sección 1) incluyó una capa base de 0,20 m de espesor, mientras que la segunda sección (Sección 2) incluyó una capa base de 0,127 m de espesor, construida con la misma geomalla. Además, una sección de control (no reforzada) fue construida con una capa base de 0,20 m de espesor. Los detalles de cada sección se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de las secciones de prueba en FM 1915.

	<i>Sección 1</i>	<i>Sección de control</i>	<i>Sección 2</i>
Refuerzo	Geomalla	-	Geomalla
Espesor de la capa base, m	0,20	0,20	0,127
Índice de plasticidad (PI)	49	37	37
Longitud total de la sección, km	1,26	1,34	1,31

Se utilizó un deflectómetro de peso de caída libre (FWD) para intentar cuantificar el comportamiento del pavimento. Sin embargo, la evaluación más clara se basó en la evaluación de la condición y la inspección visual del pavimento. Específicamente, en la sección de control se observaron importantes grietas longitudinales apenas unos meses después de la apertura de la carretera para el tráfico. Por otro lado, las dos secciones que utilizaron refuerzos de geomallas mostraron un buen desempeño sin grietas longitudinales. Aunque los mecanismos reales que condujeron a la mejora del comportamiento de las secciones reforzadas con geomallas no se identificaron completamente, es evidente que una clara lección puede aprenderse de esta experiencia de campo: Los geosintéticos de refuerzo impidieron la propagación de grietas longitudinales mientras que las secciones de control, aunque estabilizadas con cal, exhibieron considerable agrietamiento longitudinal. La Figura 4 ilustra las características de las tres secciones experimentales y detalles de su comportamiento.

LECCIÓN 2: LA PRESENCIA DE GEOSINTÉTICOS FACILITA LA REUBICACIÓN DE GRIETAS MÁS ALLÁ DEL ÁREA DE PAVIMENTO REFORZADO

Un segundo proyecto evaluado como parte de este estudio proporcionó evidencias adicionales sobre los mecanismos involucrados en el refuerzo de pavimentos. Este proyecto consiste de una sección reforzada con geomallas en la carretera FM 542, localizada en el condado de León, Texas, Estados Unidos. En marzo de 2005 se cerró esta carretera para la reparación de la sección principal del pavimento. La porción de carretera en la hombrera fue también mejorada para servir como un carril de tráfico alternativo. El refuerzo de la hombrera consistía en estabilizar con cal la subrasante, usar una base flexible y una capa de tratamiento superficial. Finalmente, se colocó una geomalla en la interfaz entre la capa base y la subrasante.

Para sorpresa de los inspectores de campo, se observaron grietas longitudinales en el pavimento incluso antes que esta sección fuese abierta al tráfico. Específicamente, se desarrollaron grietas longitudinales a una distancia de aproximadamente 1 m desde el borde de la hombrera. Se llevó a cabo una investigación forense para evaluar las razones de la falla prematura del pavimento reforzado con geomallas. Se excavó una trinchera para exponer un corte vertical de la parte del pavimento agrietado. La excavación hasta el nivel de subrasante reveló que faltaba el refuerzo de geomalla en la sección deteriorada del pavimento. La evaluación indicó que el contratista había utilizado un rollo de geomalla más angosto que el especificado y, en consecuencia, la geomalla no cubría la totalidad del pavimento. En realidad, la grieta longitudinal

se desarrolló exactamente a lo largo del borde de la geomalla donde comenzaba la porción no reforzada del pavimento debido al uso de una geomalla más angosta que la especificada. La Figura 5 muestra una vista de la trinchera excavada indicando el borde del rollo de la geomalla. El rollo tenía 3 m de ancho en lugar de los 4,2 m de ancho especificados. Este incidente requirió que el contratista tuvo que reconstruir las porciones de la carretera construidas con la geomalla incorrecta. Sin embargo, este caso proporcionó evidencias adicionales del efecto benéfico de geosintéticos utilizados como refuerzo sobre arcillas expansivas. Específicamente, la utilización de geosintéticos de refuerzo trasladó el desarrollo de las grietas longitudinales que podrían haberse desarrollado dentro del área del pavimento hasta la zona no reforzada del pavimento.



Figura 4: Comparación del desempeño de secciones de pavimento sobre arcillas expansivas (FM 1915): (a) Sección 2 reforzada con geomalla; (b) Sección de control (no reforzada); (c) Sección 1 reforzada con geomalla.

LECCIÓN 3: LAS ESPECIFICACIONES UTILIZADAS ACTUALMENTE HAN LLEVADO A UN DESEMPEÑO INCONSISTENTE DE PAVIMENTOS REFORZADOS

Un tercer proyecto evaluado en este estudio revela la necesidad de un mejor entendimiento de las propiedades de las geomallas que rigen el comportamiento de pavimentos reforzados. Este proyecto corresponde a FM 1774, una carretera ubicada en el condado de Grimes, Texas, Estados Unidos. En agosto de 2002 se reconstruyeron 14,68 km de la carretera. Durante el proyecto, la carretera existente fue reconstruida con 0,25 m de subrasante estabilizada con cemento-cal, 0,18 m de base flexible y una capa asfáltica de superficie. Investigación de campo y ensayos de suelo indicaron la presencia de arcillas de alta plasticidad ($PI = 40$) en la subrasante. Debido a esto se especificó que estas áreas fueran reforzadas con una geomalla colocada en la interface entre la capa base y la subrasante. Dos fabricantes de geomallas diferentes respondieron a la licitación del proyecto, ambos con geomallas que satisfacían las especificaciones de material del proyecto. Los productos utilizados fueron una geomalla de polipropileno (Geomalla A) y una geomalla de poliéster (Geomalla B).

Durante el verano de 2004, se observaron grietas longitudinales en las secciones de pavimento reforzadas con la Geomalla B, mientras que las secciones de pavimento reforzadas con la Geomalla A se comportaron adecuadamente. Se excavaron trincheras para una evaluación forense de las grietas longitudinales, las que indicaron que la Geomalla B había fallado en su junta (es decir, en la intersección donde se cruzan las costillas longitudinales y transversales de la geomalla), como se muestra en la Figura 6. Las propiedades de las dos geomallas utilizadas en este proyecto se muestran en la Tabla 3 junto a los valores definidos por las especificaciones de este proyecto.



Figura 5: Vista del borde de la geomalla de refuerzo directamente debajo de una grieta longitudinal.



Figura 6: Separación de costillas longitudinales y transversales en las juntas de la Geomalla B en la ruta FM 1774.

Tabla 3: Comparación de las propiedades de las geomallas y las especificaciones dadas por TxDOT.

	<i>Geomalla A</i>	<i>Geomalla B</i>	<i>Recomendado</i>
Tamaño de la abertura, mm	35	43	25-50
% de área abierta	75 %	74 %	Min. 70%.
Módulo de tracción para una deformación de 2%, kN/m	215	385	200-300
Resistencia última de tracción			
Dirección de producción (MD), kN/m	26	44	-
Dirección contraria de producción (CD), kN/m	21	25	-
Resistencia de junta, kN/m	22.5	11	-
Eficiencia de junta	93 %	35 %	Min. 70%.

La eficiencia de junta se define como la relación entre la resistencia de la junta y la resistencia a la tracción de la costilla longitudinal. La Geomalla B tiene una eficiencia de junta menor que aquella de la Geomalla A. Sin embargo, debe señalarse que la Geomalla B fue considerada aceptable ya que la resistencia de junta era comparativamente alta. Es decir, la baja eficiencia de junta ocurría porque la Geomalla B tenía una resistencia a la tracción particularmente alta.

En definitiva, está claro que las especificaciones basadas en propiedades de resistencia a la tracción de la geomalla (costillas y juntas) no son suficientes para identificar las propiedades de las geomallas que rigen el comportamiento de pavimentos reforzados sobre arcillas expansivas. Esto indica que se necesita una mejor caracterización de materiales basada en los mecanismos de refuerzo que permita identificar las diferencias en el desempeño de los varios geosintéticos en el contexto de su uso como refuerzo de pavimentos.

CONCLUSIONES

Este estudio presenta una evaluación de casos de campo involucrando pavimentos construidos sobre arcillas expansivas y reforzados con geosintéticos. Esta evaluación indicó que:

- Los geosintéticos utilizados como refuerzo pueden minimizar efectivamente el desarrollo de grietas longitudinales en pavimentos construidos sobre arcillas expansivas.
- Los geosintéticos utilizados como refuerzo consiguen reubicar grietas longitudinales más allá de la zona de pavimento reforzado, y
- Tanto las especificaciones disponibles como los métodos de ensayo existentes para caracterizar los refuerzos de pavimento no son suficientes para identificar los parámetros que rigen el desempeño de pavimentos reforzados.

REFERENCIAS

- Al-Qadi, I.L., Brandon, T.L. y Bhutta, A. (1997). "Geosynthetic stabilized flexible pavements", *Proceedings of Geosynthetics '97*, IFAI, Long Beach, California, USA, Vol. 2, pp. 647-662.
- Berg, R.R., Christopher, B.R. y Perkins, S.W. (2000). "Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Sub-base Courses of Pavement Structures", GMA White Paper II, Geosynthetic Materials Association, Roseville, Minnesota, USA, 176 p.
- Fanin R.J. y Sigurdsson O. (1996). "Field observations on stabilization of unpaved roads with geosynthetics", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 7, pp. 544-553.
- Holtz, R.D., Christopher, B.R. y Berg, R.R. (1998). "Geosynthetic Design and Construction Guidelines", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA-HI-98-038, 460 p.
- Perkins, S.W. y Ismeik, M. (1997a). "A synthesis and evaluation of geosynthetic reinforced base course layers in flexible pavements: Part I experimental work", *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 6, pp. 549-604.
- Perkins, S.W. y Ismeik, M. (1997b). "A synthesis and evaluation of geosynthetic reinforced base course layers in flexible pavements: Part II analytical work", *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 6, pp. 605-621.
- Petry, T.M. y Little, D.N. (2002). "Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures- History, practice and future", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 447-460.
- Zornberg, J.G., Prozzi, J.A., Gupta, R., Luo, R., McCartney, J.S., Ferreira, J.Z. y Nogueira, C. (2008). "Validating Mechanisms in Geosynthetic Reinforced Pavements", Center for Transportation Research (CTR), Report No. 0-4829-1, Austin, Texas, February 2008.